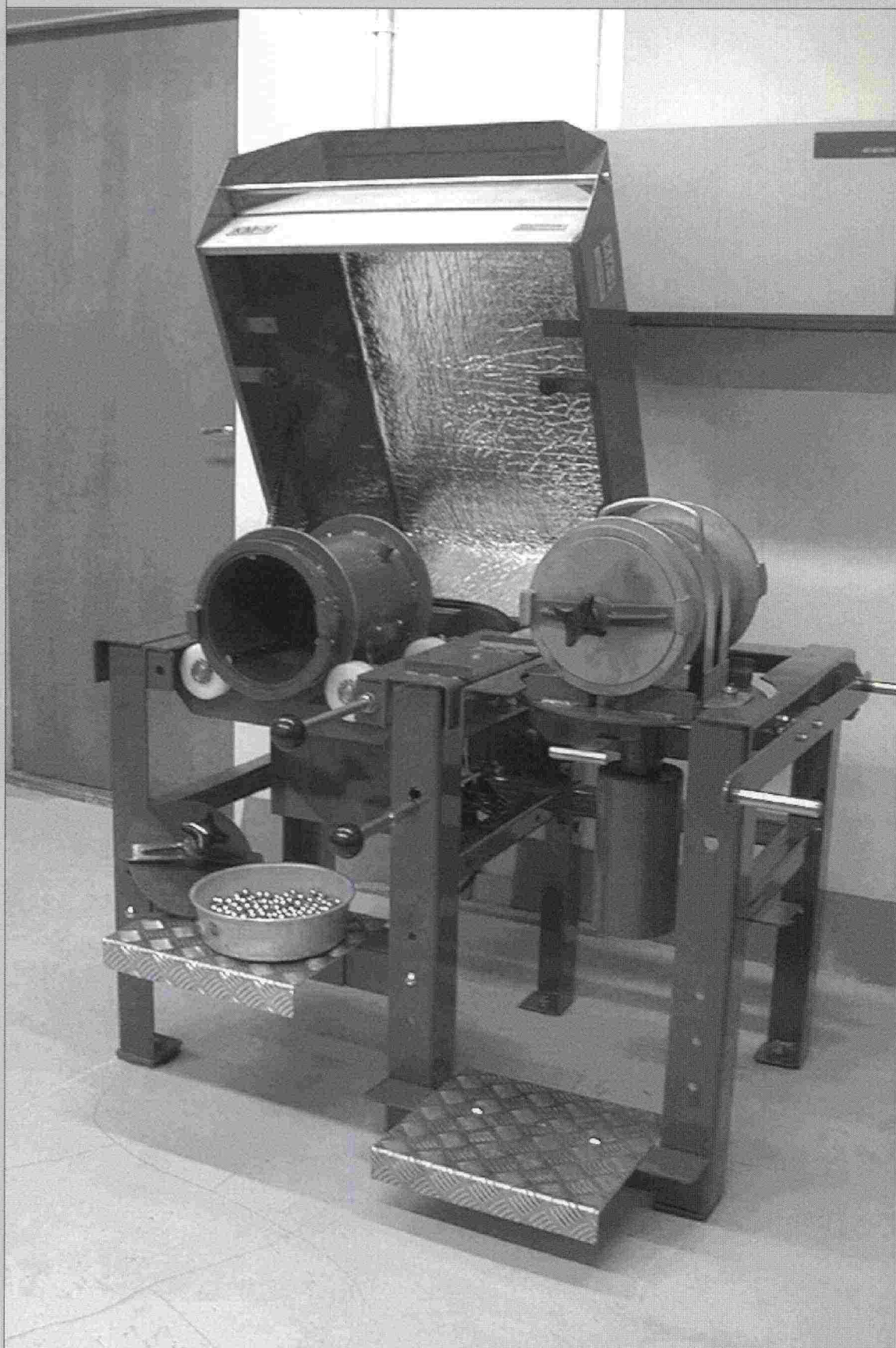


Tielaitos

Kuulamyly- ja Micro-Deval -kokeiden tulosten vastaavuus



Tielaitoksen
selvityksiä

30/1999

Helsinki 2000

TIEHALLINTO
Tie- ja
liikennetekniikka

Tielaitoksen selvityksiä
30/1999

Jarmo Vuorinen

Kuulamyly- ja Micro-Deval -kokeiden tulosten vastaavuus

Tielaitos
TIEHALLINTO
Helsinki 2000

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-559-X
TIEL 3200575

Oy Edita Ab
Helsinki 2000

Julkaisua myy
Tielaitos, painotuotepalvelut
Telefax 0204 44 2652
www.tielaitos.fi/kirjasto/tilaus.htm



Tielaitos
TIEHALLINTO
Tie- ja liikennetekniikka
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 44 150

Asiasanat: kiviainekset, päällysteet, kulumiskestävyys, kuulamyly, Micro-Deval

Aiheluokka: 33, 42, 56

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuulamylykokeen ja Micro-Deval-kokeen tulosten vastaavuus sekä tarkastella kiviaineksen raemuodon vaikutusta lujuustuloksiin. Tutkimukseen valittiin 15 erityyppistä kiveä, joista kahdestatoista välpättiin raemuodoltaan sekä ns. hyvää että ns. huonoa kiviainesta. Tyypillisten suomalaisten kivien lisäksi tutkimukseen valittiin kulutuskestävyydeltään heikkoja kiviä eli vuolukivi ja kolme kalkkikiveä. Kaikista kiviaineksista, joita oli yhteensä 27, määritettiin kuulamylyarvo, Micro-Deval-arvo, litteysluku ja kiintotiheys. Lisäksi kuudesta kiviaineksesta määritettiin Micro-Deval-arvo kuiva-ajona.

Tulosten perusteella kuulamylykokeen ja Micro-Deval-kokeen tulokset korreloivat hyvin keskenään. Korrelaatiokerroin (r) vaihtelee tutkittavasta kiviainesryhmittelystä riippuen välillä 0,87 – 0,99. Tämän perusteella kuulamylykoe voidaan tarvittaessa korvata Micro-Deval-kokeella niin päällystekiviainesten kuin sitomattomien kerrosten kiviainesten testauksessa ja luokittelussa.

Menetelmien hyvästä keskinäisestä riippuvuudesta johtuen nykyisille päällystekiviainesten kuulamylyarvoon perustuvilla laatuluokkien raja-arvoille voidaan melko luotettavasti antaa vastaava Micro-Deval-arvo. Kuitenkin alle 20 % kuulamylyarvon omaavilla päällystekiviaineksilla mahdollinen Micro-Deval-kokeen raja-arvo tulee asettaa varmuuden vuoksi ns. varmalle puolelle eli mahdollisimman pieneksi. Tämä johtuu siitä, että tuloksissa on näillä kiviaineksilla kohtalaisen suuri hajonta ja että ei ole varmaa tietoa Micro-Deval-arvon ja tiekulumisen välisestä riippuvuudesta. Kuulamylyarvoja 7, 10, 14, 19 ja 30 % vastaavat lujuusluokkien raja-arvot voisivat tällöin olla Micro-Deval-arvoina 4, 6, 9, 13 ja 19 % tai lievemmin arvosteltuna 5, 7, 10, 14 ja 21 %.

Kiviaineksen raemuodon vaikutus kuulamyly- ja Micro-Deval-arvoihin oli melko vähäistä ja kivikohtaista. Kahden raemuotoluokan (ns. hyvä ja huono raemuoto) perusteella esimerkiksi litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen (raemuodon huononeminen) suurensi kuulamylyarvoa tutkituilla kivillä noin 1 – 11 % ja Micro-Deval-arvoa pääosin 0 – 10 %. Muista kivistä poiketen yhdellä kivellä raemuodon vaikutus Micro-Deval-kokeen tulokseen oli jopa 69 %. Kaikki tutkimuksessa mukana olevat kivet huomioiden kuulamylykoe vaikuttaa tuovan esille Micro-Deval-koetta luotettavammin raemuodon vaikutuksen lujuusarvoon.

Micro-Deval-kokeella tehdyt kuiva-ajot osoittivat, että koemenettely korreloi hyvin Micro-Deval-kokeen normaalin märkäajon ja kuulamylykokeen kanssa. Tulokset olivat lukuarvoltaan 46 – 83 % pienempiä kuin märkäajossa, joten mikäli kuiva-ajoa halutaan käyttää kiviainesten luokittelussa, tulisi sille luoda erilliset laatuluokkavaatimukset. Toisaalta kuiva-ajo ei välttämättä sovellu suomalaisille kiviaineksille, koska näillä Micro-Deval-kokeen kuiva-ajon riippuvuus sekä saman kokeen märkäajon että kuulamylykokeen kanssa oli heikko.

Key words aggregate, asphalt, wear resistance, abrasion, Micro Deval

ABSTRACT

The aim of the study was to find out how well the results of the Nordic abrasion test and Micro-Deval test correspond with one another and to examine the impact the mineral aggregate's particle shape has on the abrasion values. 15 different rock types were selected for the study, 12 of which were screened into particle shape groups of "good" and "bad" aggregate. In addition to typical Finnish rocks, some rocks that had a low wear resistance, i.e. soap stone and three types of limestone, were selected for the study. All of the 27 aggregates were measured a Nordic abrasion value, Micro-Deval coefficient, flakiness index and specific gravity. Six of the aggregates were also given a Micro-Deval test in dry conditions.

According to the findings, the results of the Nordic abrasion test and the Micro-Deval test correlate strongly with one another. The coefficient of correlation (r) varies between 0,87 and 0,99, depending on the group of aggregates being studied. These results suggest that a Nordic abrasion test can, if necessary, be replaced with a Micro-Deval test when testing and classifying both mineral aggregates for asphalt surfaces and those for unbound courses.

Due to the fact that the two testing methods correspond so well with one another, the current limits of the quality classes of asphalt surface aggregates, based on the Nordic abrasion values, can quite confidently be given a corresponding Micro-Deval coefficient. However, in the case of aggregates that have Nordic abrasion values of less than 20 %, the limits set for the possible Micro-Deval tests should be conservative, i.e. as low as possible, just to be on the safe side. This is because the results obtained from these mineral aggregates show quite a lot of deviation, and because the relationship between the Micro-Deval coefficient and road wear has not been positively confirmed in Finland. Therefore, the category limits that correspond with the Nordic abrasion values of 7, 10, 14, 19 and 30 % could be set at 4, 6, 9, 13 and 19 % as Micro-Deval coefficients. These limits could be also set less conservatively at 5, 7, 10, 14 and 21 %.

The impact of an aggregate's particle shape on the Nordic abrasion value and Micro-Deval coefficient was quite minor and depended on the type of rock being examined. According to the results obtained by using two particle shape categories (the "good" and "bad" particle shape), an increase of the flakiness index by 10 percentage units (deterioration of the particle shape), for instance, increased the Nordic abrasion value of the examined rocks by about 1 – 11 % and the Micro-Deval coefficient of most of the rocks by 0 – 10 %. Unlike the other rocks, the impact of the particle shape on the results of the Micro-Deval test was up to 69 % with one of the rock types. Taking into account the test results of all of the rock types involved in the study, the Nordic abrasion test seems to bring out the impact the particle shape has on the abrasion value more reliably than the Micro-Deval test does.

ALKUSANAT

Kuulamylykoe ja Micro-Deval-koe, joista molemmista on julkaistu EN-menetelmäkuvaukset, ovat tärkeimmät testimenetelmät tarkasteltaessa karkean kiviaineksen hiovaa ja raapivaa kulumiskestävyyttä. Kuulamylykoetta käytetään arvosteltaessa asfalttipäällysten kiviaineksia nastarengaskulutusta vastaan ja Suomessa myös raidesepelin ja betonin kiviaineksia. Micro-Deval-koetta käytetään Euronormeissa kuulamylykokeen tavoin testattaessa asfalttipäällysteiden kiviaineksia ja lisäksi myös testattaessa sitomattoman kantavan kerroksen materiaaleja. Suomessa Micro-Deval-koe ei ainakaan vielä sisälly mihinkään kiviainesnormeihin.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuulamylykokeen ja Micro-Deval-kokeen tulosten vastaavuus. Lisäksi tavoitteena oli selvittää kiviaineksen raemuodon vaikutusta lujuuskokeiden tuloksiin ja arvioida mahdollisia muutostarpeita Asfalttinormien kiviainesvaatimuksiin.

Tutkimuksen tilaajana oli Tielaitoksen tie- ja liikennetekniikka. Tutkimusta valvoivat tielaitoksen edustajina diplomi-insinööri *Kari Lehtonen*, diplomi-insinööri *Jorma Heikkilä* ja tieinsinööri *Mats Reihe*. Tutkimuksen vastuuhenkilönä ja raportin laatijana oli tutkija *Jarmo Vuorinen* Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) Yhdyskuntatekniikan tutkimusyksiköstä.

Helsingissä tammikuussa 2000

Tielaitos
Tie- ja liikennetekniikka

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	TUTKITTAVAT KIVIAINEKSET	10
3	LABORATORIOKOKKEET	12
4	TULOKSET	13
5	TULOSTEN TARKASTELU	16
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
7	KIRJALLISUUSLUETTELO	26

1 JOHDANTO

Tienrakentamisessa käytettäviä kiviaineita voidaan arvostella eri testimenetelmien perusteella. Kun tarkastellaan kiviainesten kulumiskestävyyttä hiovaa ja raapivaa kulutusta vastaan tärkeimmät testimenetelmät ovat kuulamylykoe ja Micro-Deval-koe.

Kuulamylykokeesta on eurooppalainen standardi EN 1097-9 vahvistettu vuonna 1998 suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi SFS-EN 1097-9 /1/. Tämä standardi on mainittu Tielaitoksen kiviainesvaatimuksissa /2/ tutkittaessa päällystekiviaineksen kelpoisuutta. Menetelmää voidaan soveltaa sekä raaka-aine- että tuotetestauksessa. Vanhoissa Asfalttinormeissa 1995 /3/ kuulamylykokeena oli mainittu PANK-2207 /4/, joka oli raaka-ainetesti sisältäen siis testattavan materiaalin raemuodon vakioinnin välppäämällä (8 ja 10 mm välpät). Asfalttinormeissa 2000 /5/ menetelmänä on SFS-EN 1097-9, joka poikkeaa vain hyvin vähän aiemmasta tuotetestistä PANK-2208 /6/. Selvin ero on kahden osanäytteen testaaminen aiemman yhden näytteen sijaan. Lisäksi VR käyttää vielä raidesepelin testaamiseen vanhaa raaka-ainemenetelmää TIE 242 /7/ (VR 1995 /8/), jossa välppäseulana on yksinomaan 5,6 mm välppä ja jossa 14 mm seulan sijasta käytetään 13,2 mm seulaa testattavan materiaalin lajitteiden jaossa (11,2 – 13,2 / 14,0 – 16 mm).

Micro-Deval-koe on alkujaan ranskalainen kiviainetesti, joka poikkeaa kuulamylykokeesta lähinnä myllyn mittasuhteiden ja kierrosnopeuden, myllyn nostoripojen puuttumisen, teräskuulien koon ja määrän sekä testattavan kiviaineksen rakeisuuden (10 – 14 mm) ja määrän (5 kg) suhteen. Lisäksi Suomessa käytössä olevilla rumpumalleilla Micro-Deval kokeessa voidaan kuulamylykokeesta poiketen testata kaksi osanäytettä samalla kertaa. Eurooppalaisesta standardista EN 1097-1:1996 /9/ on vuonna 1997 vahvistettu voimaansaattamisilmoituksella suomalainen kansallinen standardi SFS-EN 1097-1 /10/. Suomessa Micro-Deval-koe ei ole kuitenkaan vielä käytössä arvosteltaessa esimerkiksi asfalttipäällysteiden tai sitomattoman kantavan kerroksen kiviaineita. Koetta on tähän asti käytetty vain tutkimustarkoituksessa, esimerkiksi kaupunkien ja kuntien päällysteitä koskevassa Katurakenteet ja -päällysteet-tutkimusohjelmassa /esim. 11/. Jatkossa ainakin raidesepelin testauksessa tullaan käyttämään Micro-Deval-koetta, joskin myllyn mittasuhteet ja kuulien käyttö (ei kuulia) sekä testattavan materiaalin määrä (25 kg) ja rakeisuus (31,5 – 50 mm) tulevat olemaan menetelmästä SFS-EN 1097-1 poikkeavia /12/.

Asfalttipäällysteiden kiviaineita koskevassa EN-standardiluonnoksessa prEN 13043 /13/ kiviainekset on luokiteltu kuuteen laatuluokkaan kuulamylykokeen perusteella. Luokat esitetään taulukossa 1. Vastaavat luokat (I – VI) ja raja-arvot on myös Tielaitoksen kiviainesvaatimuksissa /2/. Asfalttinormeissa /3, 5/ esiintyy vain neljä ensimmäistä luokkaa (I – IV) kuulamylykokeen maksimiarvon ollessa 19 %.

Taulukko 1. Kiviainesten luokitus kuulamylykokeen perusteella /13/.

Kuulamylyarvo Nordic abrasion value	Luokka Category A_N	Laatuluokka TIEL /2/
≤ 7	A_N7	I
≤ 10	A_N10	II
≤ 14	A_N14	III
≤ 19	A_N19	IV
≤ 30	A_N30	V
Ei vaatimusta	A_NNR	VI

EN-standardin luonnoksessa /13/ on vastaavanlainen luokitus käytössä myös Micro-Deval-kokeelle (taulukko 2). Luokitus koskee siis asfalttipäällysteissä käytettäviä kiviaineksia. Vastaavanlainen luokitus /14/ on myös kiviaineksille, joita käytetään päällysteen alapuolisissa sitomattomissa ja hydraulisesti sidotuissa kerroksissa. Tämä luokitus esitetään taulukossa 3.

Taulukko 2. Kiviainesten luokitus Micro-Deval-kokeen perusteella / asfalttipäällysteet /13/.

Micro-Deval-arvo Micro-Deval coefficient	Luokka Category MDE
≤ 10	$M_{DE}10$
≤ 15	$M_{DE}15$
≤ 20	$M_{DE}20$
≤ 25	$M_{DE}25$
≤ 35	$M_{DE}35$
Ei vaatimusta	$M_{DE}NR$

Taulukko 3. Kiviainesten luokitus Micro-Deval-kokeen perusteella / sitomat-
tomat ja hydraulisesti sidotut kerrokset /14/.

Micro-Deval-arvo Micro-Deval coefficient	Luokka Category MDE
≤ 20	M _{DE} 20
≤ 25	M _{DE} 25
≤ 30	M _{DE} 30
≤ 40	M _{DE} 40
≤ 50	M _{DE} 50
Ei vaatimusta	M _{DE} NR

2 TUTKITTAVAT KIVIAINEKSET

Tutkimukseen pyrittiin valitsemaan ensiksikin tyypillisiä suomalaisia tienrakentamisessa (asfalttipäällysteet ja sitomaton kantava kerros) käytettäviä kiviä, joiden kuulamylyarvot ovat yleensä välillä 5 – 20 %, ja toiseksi kulutuskestävyydeltään näitä heikompia kiviä, jollaisia käytetään yleisesti tierakentamisessa useissa muissa maissa. Tyypillisiä suomalaisia kiviä valittiin tutkimukseen kymmenen ja heikompia kiviä eli lähinnä kalkkikiviä viisi. Tutkimukseen valittiin taulukossa 4 esitetyt kivet, jotka on nimetty kirjaimin A - O.

Taulukon 4 kahdestatoista ensimmäisestä kivistä (kivet A – L) tutkimukseen valittiin raemuodoltaan sekä ns. hyvää että ns. huonoa kiviainesta. Koska tutkimuksessa pyrittiin käyttämään mahdollisuuksien mukaan aiemmin muissa tutkimuksissa käytettyjä ja jo valmiiksi seulottuja ja osin jo välpättyjäkin aineksia, raemuodoltaan hyvää ja huonoa kiviainesta on valmistettu kolmella eri välppäystavalla.

Ensimmäisessä välppäystavassa, joka käsitti viisi ensimmäistä kiveä (kivet A – E), murskelajitteet 8 – 12,5 ja 12,5 – 16 mm välpättiin aluksi 8 ja 11,2 mm välppäseuloilla, minkä jälkeen niistä määritettiin litteysluvut. Alitteiden litteysluvuista riippuen lajite 8 – 12,5 mm välpättiin uudelleen joko 6,13 tai 5 mm välppäseulalla ja lajite 12,5 – 16 mm joko 8 tai 10 mm välppäseulalla. Lopuksi hyvän ja huonon muotoiset tuotteet sekoitettiin siten, että raemuodoltaan hyvällä aineksella päästiin noin 5 % ja huonolla noin 20 % litteysluukuun. Työn teki Lohja Rudus Oy.

Toisessa välppäystavassa, joka sisälsi seuraavat kolme kiveä (kivet F – H), kiviainesten normaalimurskauksessa syntynyt aines luokiteltiin raemuodoltaan huonoksi. Hyvämuotoinen kiviaines saatiin välppäämällä lajitteet 10 – 12,5 ja 12,5 – 16 mm 8 ja 10 mm välppäseuloilla (= välpille jäänyt aines).

Kolmas välppäystapa, joka sisälsi neljä seuraavaa kiveä (kivet I – L), tehtiin samalla tavalla kuin välppäys B, mutta tässä tapauksessa edellä mainituille välpille jääneiden ainesten yhdistämisen (hyvä aines) lisäksi välppien läpäisseet ainekset yhdistettiin ns. huonoksi kiviainekseksi.

Kolmesta kalkkikivestä (kivet M - O) tutkittiin raemuodoltaan vain yhtä kiviainesta. Näistä kivistä kahdella (kivet M ja N) oli raemuoto erittäin hyvä ja yhdellä (kivi O) edellisiä jonkin verran huonompi.

Kahta kiveä lukuun ottamatta kaikki tutkittavat kivet olivat peräisin normaalisti, pääosin 3-vaiheisesta tuotantomurskauksesta. Vain vuolukivi ja yksi kalkkikivi (kivi L) on murskattu laboratorioleukamurskaimilla. Kaikista kiviaineksista seulottiin lopuksi lajitteet 11,2 – 16 mm (kuulamylykoe) ja 10 – 14 mm (Micro-Deval-koe).

Taulukko 4. Tutkimukseen valitut kiviainekset.

KIVI	KIVIAINES N:RO	MUOTO	VÄLPPÄYS	KIVILAJI
A	1	Hyvä	1	Kiilleliuske
	2	Huono		
B	3	Hyvä	1	Granodioriittigneissi
	4	Huono		
C	5	Hyvä	1	Gabro
	6	Huono		
D	7	Hyvä	1	Kiilleliuske
	8	Huono		
E	9	Hyvä	1	Emäksinen vulkaniitti
	10	Huono		
F	11	Hyvä	2	Amfiboliitti
	12	Huono		
G	13	Hyvä	2	Tonalitti
	14	Huono		
H	15	Hyvä	2	Plagioklaasiporfyyriitti
	16	Huono		
I	17	Hyvä	3	Graniitti
	18	Huono		
J	19	Hyvä	3	Graniitti
	20	Huono		
K	21	Hyvä	3	Vuolukivi (laboratoriomurskaus)
	22	Huono		
L	23	Hyvä	3	Kalkkikivi (laboratoriomurskaus)
	24	Huono		
M	25	Hyvä	-	Kalkkikivi
N	26	Hyvä	-	Kalkkikivi (dolomiitti)
O	27	Huono	-	Kalkkikivi

3 LABORATORIOKOKKEET

Kaikista taulukon 4 kiviaineksista määritettiin VTT:n Yhdyskuntatekniikan kivilaboratoriossa seuraavat ominaisuudet:

- Kuulamylyarvo
- Micro-Deval-arvo
- Litteysluku
- Kiintotiheys

Kuulamylykoe on tehty menetelmällä SFS-EN 1097-9 /1/, jossa testataan erikseen kaksi 11,2 – 16 mm yksittäisnäytettä. Kuulamylyarvo, joka ilmoitetaan yhden desimaalin tarkkuudella, on kahden yksittäisnäytteen tuloksen keskiarvo. Yksittäisnäytteiden tulosten erotus on oltava yhtäsuuri tai pienempi kuin 7 % niiden keskiarvosta.

Micro-Deval-koe on tehty menetelmällä SFS-EN 1097-1 /10/. Kokeessa testataan yhtäaikaaisesti kaksi 10 – 14 mm kiviainesnäytettä. Normaaliin määrittämisen lisäksi neljällä kivellä (kivet F, I, N ja O) on tehty kulutusajot ilman vettä (menetelmäkuvauksen liite / annex A). Micro-Deval-arvo saadaan kahden näytteen tuloksen keskiarvona ja ilmoitetaan yleensä kokonaislukuna. Tässä tutkimuksessa tulokset on ilmoitettu yhden desimaalin tarkkuudella.

Kiviaineksen raemuotoa kuvaava litteysluku on määritetty välppäämällä menetelmän SFS-EN 933-3 /15/ mukaisesti. Litteys on tässä tapauksessa määritetty lajitteesta 10 – 16 mm.

Kiintotiheys on määritetty vedessä punnitsemalla menetelmällä PANK-2107 /16/. Määrittäykset on tehty lajitteesta 11,2 – 16 mm.

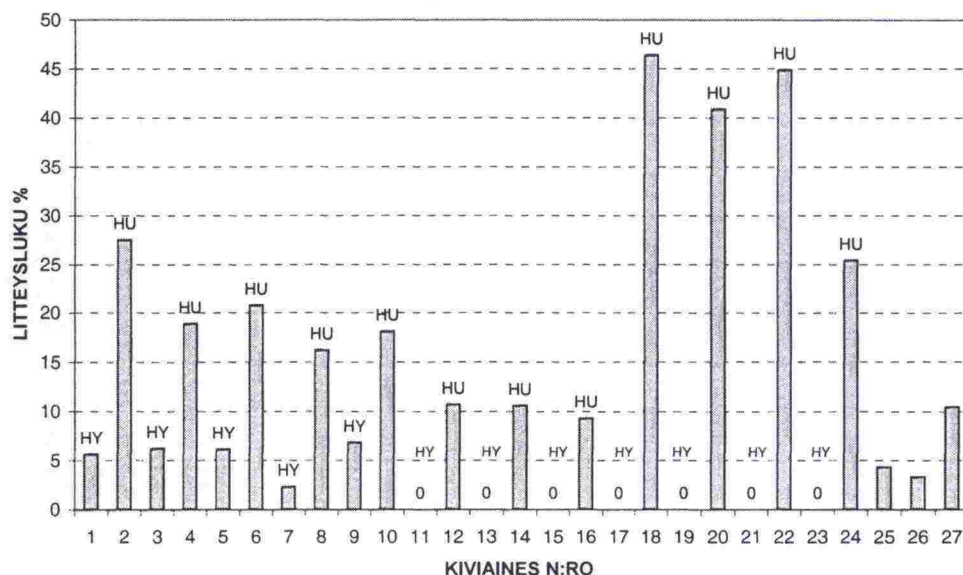
4 TULOKSET

Taulukossa 5 on esitetty tutkituista kiviaineksista määritetyt litteysluvut (LL), kuulamylyarvot (KM) ja Micro-Deval-arvot (MD) sekä kiintotiheydet (KTIH). Kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden yksittäistulokset esitetään liitteessä 1.

Taulukko 5. Kiviaineskokeiden tulokset (= MD-koe ilman vettä).*

KIVI	KIVIAINES N:RO	MUOTO	LL (%)	KM (%)	MD (%)	KTIH (g/cm ³)
A	1	Hyvä	5,6	7,7	7,1	2,76
	2	Huono	27,5	8,4	7,6	
B	3	Hyvä	6,2	9,5	6,6	2,72
	4	Huono	18,9	10,4	7,2	
C	5	Hyvä	6,1	12,7	10,4	3,04
	6	Huono	20,8	13,3	11,3	
D	7	Hyvä	2,3	16,4	12,7	2,74
	8	Huono	16,2	18,9	14,6	
E	9	Hyvä	6,8	6,3	2,5	3,02
	10	Huono	18,1	6,4	5,0	
F	11	Hyvä	0	17,3	13,4	2,83
	11	Hyvä*	0	-	2,3*	
	12	Huono	10,7	18,2	12,9	
	12	Huono*	10,7	-	3,4*	
G	13	Hyvä	0	16,0	10,2	2,70
	14	Huono	10,6	17,6	10,4	
H	15	Hyvä	0	4,7	4,5	2,79
	16	Huono	9,3	5,2	4,6	
I	17	Hyvä	0	9,8	6,3	2,68
	17	Hyvä*	0	-	2,3*	
	18	Huono	46,4	11,2	6,9	
	18	Huono*	46,4	-	3,7*	
J	19	Hyvä	0	22,9	13,6	2,75
	20	Huono	40,9	24,8	13,6	
K	21	Hyvä	0	84,6	78,8	2,94
	22	Huono	44,9	95,0	71,6	
L	23	Hyvä	0	46,9	36,0	2,79
	24	Huono	25,4	47,5	35,2	
M	25	Hyvä	4,3	47,0	35,0	2,72
N	26	Hyvä	3,3	29,6	23,4	2,87
	26	Hyvä*	3,3	-	6,2*	
O	27	Huono	10,5	45,6	39,0	2,78
	27	Huono*	10,5	-	8,6*	

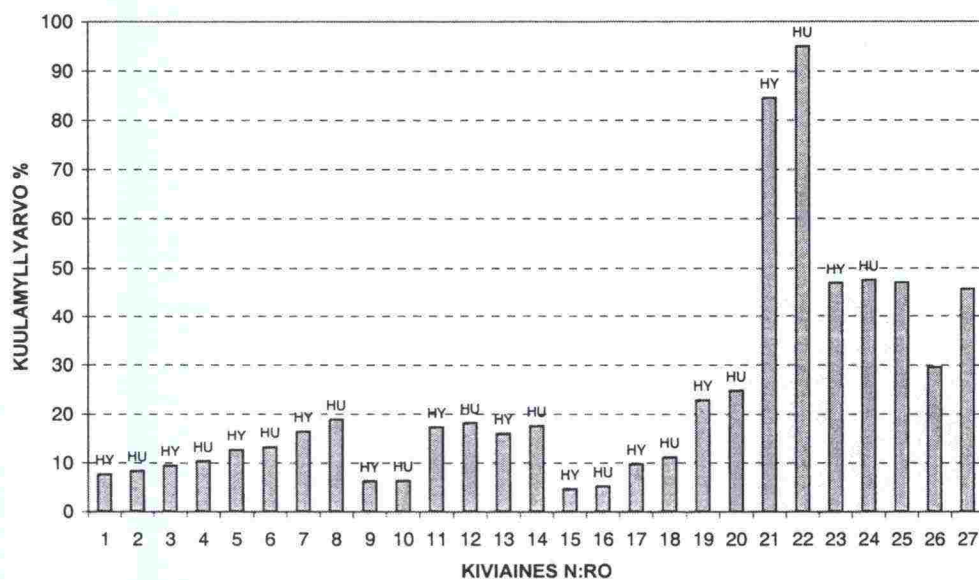
Koska käytössä oli eri välppäystapoja, kaikkien kivien raemuodoltaan hyviä aineksia ei saatu litteydeltään vakioitua, vaan litteysluvut vaihtelivat kahden viimeisen välppäystavan 0 %:sta ensimmäisen välppäystavan 7 %:iin (kuva 1). Raemuodoltaan huonoilla kiviaineksilla litteysluvut vaihtelivat selvästi hyvämuotoisia kiviaineksia enemmän. Ensimmäisen välppäyksen läpikäyneiden huonomuotoisten kiviainesten litteydet olivat 16 – 27 %. Vastaavasti toisella välppäystavalla (ei välppäystä) päästiin niinkin hyviin litteyslukuihin kuin 9 – 11 % ja kolmannella välppäystavalla litteyslukuihin 25 – 46 % (kuva 1). Saman kiven hyvän ja huonon raemuodon omaavien kiviainesten litteyslukujen erotusten vaihteluväli oli siis 9 – 46 %-yksikköä. Tutkituista kiviaineksista 15 kuului litteysluvultaan I-luokkaan, kolme II-luokkaan, kolme III-luokkaan, kolme IV-luokkaan ja kolme V-luokkaan (TIEL /2/).



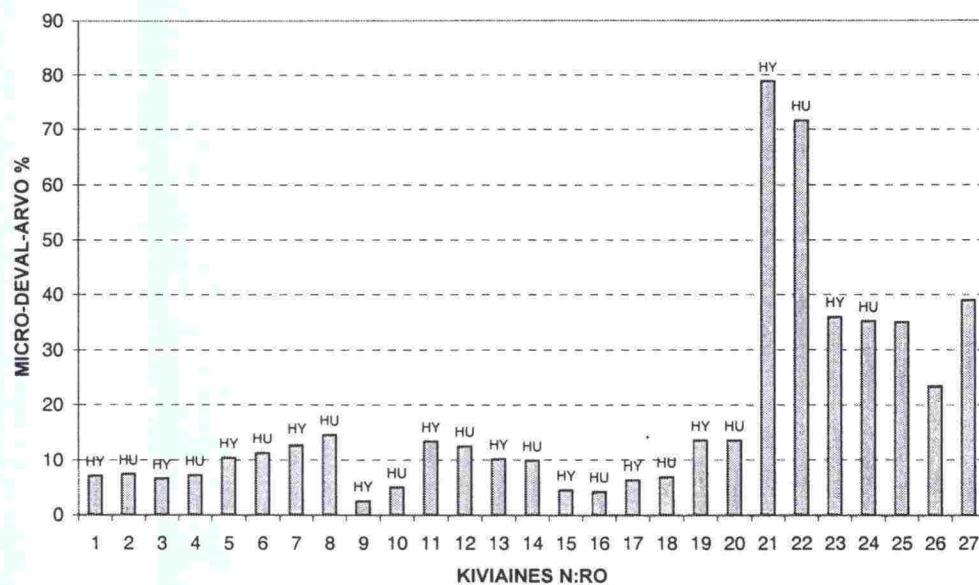
Kuva 1. Kiviainesten litteysluvut (HY = raemuodoltaan hyvä ja HU = raemuodoltaan huono kiviaines).

Tutkituista 27 kiviaineksista kuului kuulamylykokeen perusteella neljä I-luokkaan, neljä II-luokkaan, neljä III-luokkaan, kuusi IV-luokkaan, kolme V-luokkaan ja kuusi VI-luokkaan (taulukko 1, TIEL /2/). Vastaavasti Micro-Deval-kokeen perusteella kiviainesten lukumäärä luokittain (taulukko 2, EN /13/) oli 10, 10, 0, 1, 1 ja 5, joten pääpaino oli hyvin kulutuskestävissä kiviaineksissa. Mikäli tarkastellaan taulukossa 3 esitettyä luokitusta /14/ sitomattomille ja hydraulisesti sidotuille kerroksille, tutkituista kiviaineksista 20 kuului parhaimpaan M_{DE}20-luokkaan, yksi M_{DE}25-luokkaan, neljä M_{DE}40-luokkaan ja kaksi huonoimpaan M_{DE}NR-luokkaan (ei vaatimusta).

Tutkittujen kiviainesten kuulamyly- ja Micro-Deval-arvot esitetään kuvissa 2 ja 3.



Kuva 2. Kiviainesten kuulamylyarvot (HY = raemuodoltaan hyvä ja HU = raemuodoltaan huono kiviaines).



Kuva 3. Kiviainesten Micro-Deval-arvot (HY = raemuodoltaan hyvä ja HU = raemuodoltaan huono kiviaines).

5 TULOSTEN TARKASTELU

Taulukossa 6 esitetään kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden tulosten välinen lineaarinen riippuvuus korrelaatiokerroin ja matemaattisin kaavoin erilaisilla kiviaineksilla (taulukko 4):

1. kaikilla kivillä (A – O) ja kiviaineksilla (1 – 27)
2. raemuodoltaan ns. hyvillä kiviaineksilla (1, 3, 5 ... 23 sekä 25 ja 26)
3. raemuodoltaan ns. huonoilla kiviaineksilla (2, 4, 6 ... 24 ja 27)
4. tyypillisillä suomalaisilla kivillä (A – J) ja kiviaineksilla (1 – 20)
5. raemuodoltaan ns. hyvillä, tyypillisillä suomalaisilla kiviaineksilla (1, 3, 5 ... 19)
6. raemuodoltaan ns. huonoilla, tyypillisillä suomalaisilla kiviaineksilla (2, 4, 6 ... 20)
7. tyypillisillä suomalaisilla asfalttipäällysteissä käytettävillä kivillä (A – I) ja kiviaineksilla (1 – 18)

Taulukon 6 kaavat on esitetty kuvista poiketen kolmen desimaalin tarkkuudella.

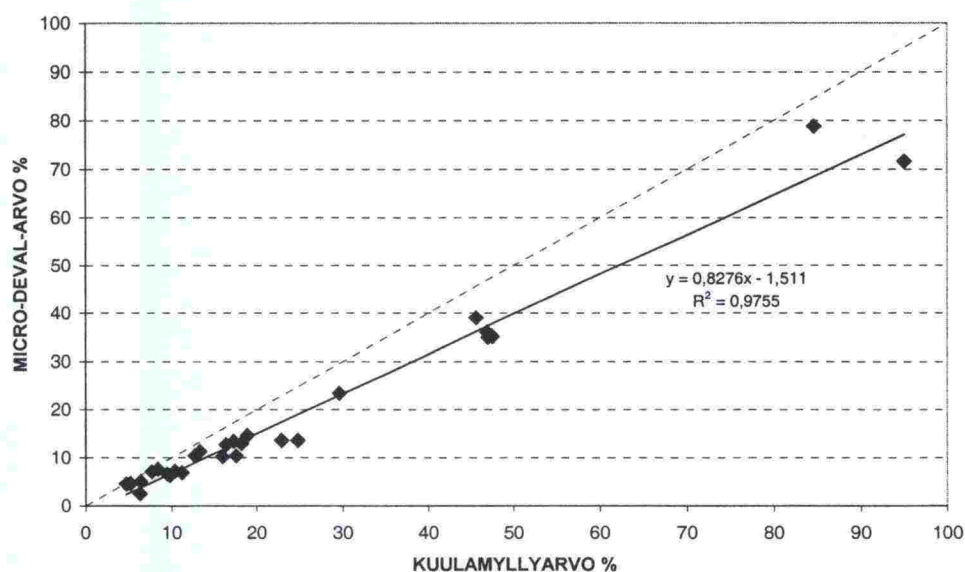
Taulukko 6. Kuulamylyarvon (KM) ja Micro-Deval-arvon (MD) välinen riippuvuus (r = korrelaatiokerroin; n = kiviainesten lukumäärä) erilaisilla kiviaineksilla.

KIVIAINEKSET	r	MD =	KM =
1. Kaikki kiviainekset ($n = 27$)	0,99	$0,828 \times KM - 1,511$	$1,179 \times MD + 2,374$
2. Hyvämuot. kiviain. ($n = 14$)	0,99	$0,903 \times KM - 2,756$	$1,086 \times MD + 3,458$
3. Huonomuot. kiviain. ($n = 13$)	0,99	$0,765 \times KM - 0,523$	$1,289 \times MD + 1,016$
4. Suomalaiset kiviain. ($n = 20$)	0,92	$0,575 \times KM + 1,666$	$1,476 \times MD - 0,501$
5. Suomal. hyvämuot. ($n = 10$)	0,93	$0,628 \times KM + 0,991$	$1,370 \times MD + 0,367$
6. Suomal. huonomuot. ($n = 10$)	0,92	$0,530 \times KM + 2,291$	$1,594 \times MD - 1,562$
7. Suomal. päällystekiviain. ($n = 18$)	0,94	$0,688 \times KM + 0,542$	$1,272 \times MD + 0,772$

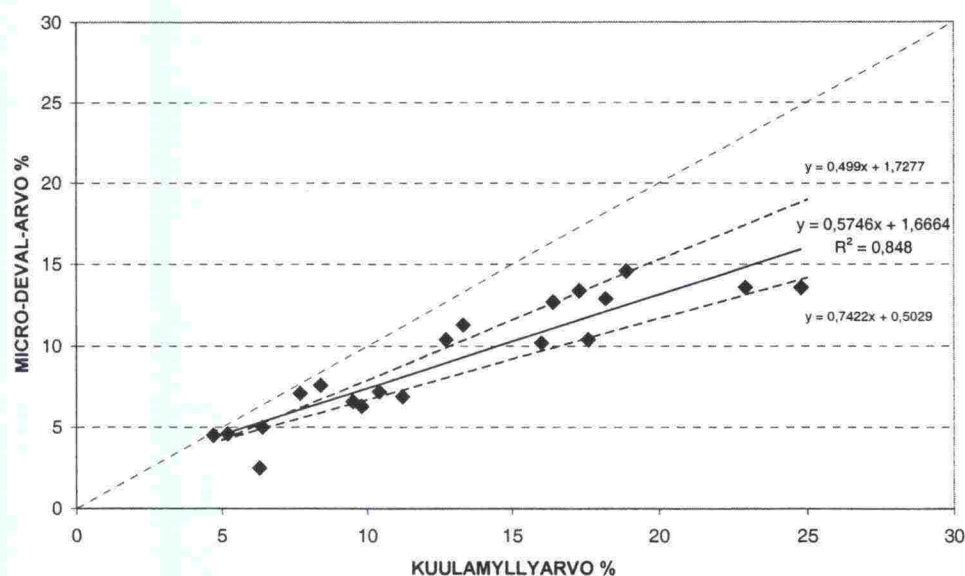
Taulukon 6 korrelaatiokerroimia tarkasteltaessa havaitaan, että kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden tulokset korreloivat erittäin hyvin keskenään. Korrelaatiokerroin (r) vaihtelee tutkittavasta kiviainesryhmittelystä riippuen välillä 0,92 – 0,99. Kaikissa tapauksissa korrelaatio on tilastomatematisesti erittäin merkitsevä riskitason ollessa pienempi kuin 0,1 %.

Kuvassa 4 esitetään kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden välinen riippuvuus kaikilla tutkituilla kiviaineksilla. Vaikka aineisto keskittyykin kuulamylyarvoihin alle 25 % ja Micro-Deval-arvoihin alle 15 %, riippuvuus on hyvin selkeä.

Erittäin hyvä korrelaatiokerroin ($r = 0,99$) selittyy lähinnä niillä muutamalla pisteellä, joilla lujuusarvot ovat muusta pistejoukosta poiketen hyvin suuria.



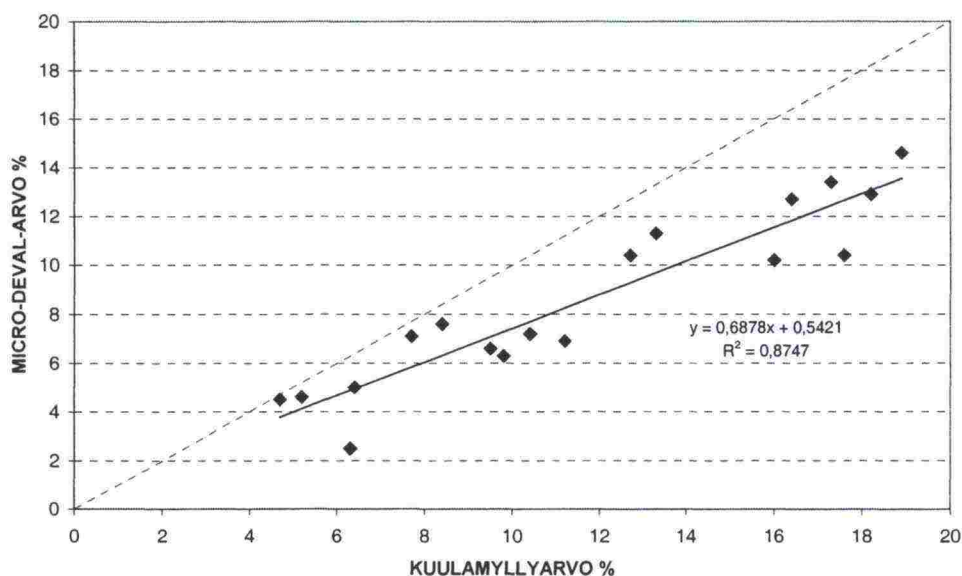
Kuva 4. Micro-Deval-arvon ja kuulamyilyarvon välinen riippuvuus kaikilla kiviaineksilla.



Kuva 5. Micro-Deval-arvon ja kuulamyilyarvon välinen riippuvuus tyypillisillä suomalaisilla kiviaineksilla. Korrelaatiosuorat on esitetty myös erikseen graniittisille kiville (alin suora) ja muille kiville (ylin suora).

Tarkasteltaessa kuvan 5 mukaisesti vain niitä lujuusarvoja, jotka edustavat tyypillisiä suomalaisten kivien lujuusarvoja, kuulamyly- ja Micro-Deval-kokeiden tulosten korrelaatio on edellistä heikompi, mutta kuitenkin riittävän hyvä esimerkiksi lujuusluokkien raja-arvojen vertailuun. Mikäli aineisto jaetaan kahteen osaan eli graniittisiin (kivet B, G, I ja J) ja muihin vähemmän happamiin kiviin, voidaan todeta, että ensin mainituilla kivillä kuulamyly- ja Micro-Deval-arvojen välinen $r = 0,99$ ja jälkimmäisillä kivillä $r = 0,97$.

Mikäli tarkasteluun otetaan vain tyypillisiä suomalaisia asfalttipäällysteissä käytettäviä kiviaineksia, joiden kuulamylyarvot ovat alle 20 % ja Micro-Deval-arvot alle 15 %, korrelaatio suoran kulmakerroin muuttuu jonkin verran edellisestä tapauksesta (kuva 6). Vaikka lujuuskokeiden tulosten riippuvuus onkin melko hyvä, pistejoukon hajonta korrelaatio suoran ympärillä on kuitenkin suurta. Koetulosten välinen riippuvuus ($r = 0,87$) heikkenee edellisestä mikäli tarkastellaan vain lujuusluokkien I – III kiviaineksia, joilla kuulamylyarvo on alle 14 %. Näitä kiviaineksia käytetään Tielaitoksen ohjeiden /17/ mukaan teillä, joiden keskivuorokausiliikenne (KVL) on pääosin yli 1500 ajoneuvoa.



Kuva 6. Micro-Deval-arvon ja kuulamylyarvon välinen riippuvuus tyypillisillä suomalaisilla, asfalttipäällysteissä käytettävillä kiviaineksilla.

Taulukoissa 1 – 3 esitettiin kiviainesten luokituksia kuulamyly- ja Micro-Deval-arvojen perusteella. Verrattaessa Tielaitoksen kiviainesvaatimuksissa /2/ ja asfalttipäällysteiden kiviaineksia koskevassa EN-standardiluonnoksessa /13/ olevia täysin identtisiä kuulamylyarvon luokkarajoja saatuihin Micro-Deval-arvoihin, saadaan taulukossa 7 esitetyt raja-arvot. Taulukossa on esitetty Micro-Deval-arvoja kolmen eri kiviainesjoukon perusteella: kaikki kiviainekset, tyypilliset suomalaiset kiviainekset ja tyypilliset suomalaiset, asfalttipäällysteissä käytettävät kiviainekset. Vastaavasti taulukossa 8 on esitetty saatuja kuulamylyarvoja EN-standardin luonnoksessa /13/ olevien Micro-Deval-kokeen raja-arvojen perusteella. Saadut lujuusarvot perustuvat taulukossa 6 esitettyihin matemaattisiin kaavoihin. Taulukoissa 7 ja 8 suluissa

esiintyvät luvut ovat epäluotettavia, ekstrapoloituja arvoja varsinaisen pistejoukon ulkopuolella.

Taulukko 7. Lujuusluokkien kuulamylyraja-arvoja (KM) /2, 13/ vastaavat Micro-Deval-arvot eri kiviaineksilla.

LUJUUSLUOKAN RAJA-ARVO KM	VASTAAVA MICRO-DEVAL-ARVO		
	KAIKKI KIVET	TYYPILLISET SUOMAL. KIVET	SUOMALAISET PÄÄLLYSTEKIVET
7	4	6	5
10	7	7	7
14	10	10	10
19	14	13	14
30	23	(19)	(21)

Taulukko 8. Lujuusluokkien Micro-Deval-arvoja (MD) /13/ vastaavat kuulamylyarvot eri kiviaineksilla.

LUJUUSLUOKAN RAJA-ARVO MD	VASTAAVA KUULAMYLYARVO		
	KAIKKI KIVET	TYYPILLISET SUOMAL. KIVET	SUOMALAISET PÄÄLLYSTEKIVET
10	14	14	13
15	20	22	20
20	26	(29)	(26)
25	32	(36)	(33)
35	44	(51)	(45)

Mikäli päällystekiviainesten lujuusluokitukseen halutaan jatkossa kuulamylykokeen rinnalle myös Micro-Deval-koe tai mikäli Micro-Deval-kokeella halutaan korvata kuulamylykoe, taulukon 7 mukaisesti lujuusluokkien raja-arvot voisivat olla Micro-Deval-arvoina 4, 6, 9, 13 ja 19. Nämä luvut ovat jonkin verran pienempiä kuin taulukossa 7 esitetyt arvot johtuen kuvan 6 pistejoukon kohtalaisen suuresta hajonnasta sekä siitä, että Micro-Deval-arvon ja tiekuluminen välinen riippuvuus ei ole tarkasti tiedossa. Ehdotetut Micro-Deval-arvot ovat siis tiukennettuja raja-arvoja. Lievemmin arvosteltuna edellä mainitut arvot voisivat olla 5, 7, 10, 14 ja 21 %.

Vastaavasti, mikäli EN-standardiluonnoksen Micro-Deval-kokeeseen perustuvien lujuusluokkien raja-arvoja halutaan rinnastaa kuulamylyarvoihin, saadaan taulukon 8 mukaisesti esimerkiksi kuulamylyarvot 13, 20, 26, 32 ja 44. Näitä lukuarvoja ei ole edellisten arvojen tapaan mitenkään kiristetty tai lievennetty.

Päällysteen alapuolisten sitomattomien kerrosten kiviainesten Micro-Deval-kokeeseen perustuva lujuusluokitus esitettiin taulukossa 3. Taulukon raja-arvoja vastaavat kaikkien tutkittujen kiviainesten perusteella kuulamylyarvot 26, 32, 38, 50 ja 61.

Kiviaineksen raemuodon vaikutus kuulamylyarvoihin oli melko vähäistä ja kivikohtaista. Kahden raemuotoluokan (ns. hyvä ja huono raemuoto) perus-

teella / kivi esimerkiksi litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen (raemuodon huononeminen) suurentaa kuulamylyarvoa tutkituilla kivillä noin 0,1 – 2,7 %-yksikköä eli 1 – 11 %. Kuulamylyarvojen ollessa alle 15 edellä mainittu raemuodon vaikutus kuulamylyarvoon on alle 0,7 %-yksikköä, joskin prosentteina laskettuna vaikutus voi olla jopa 11 %.

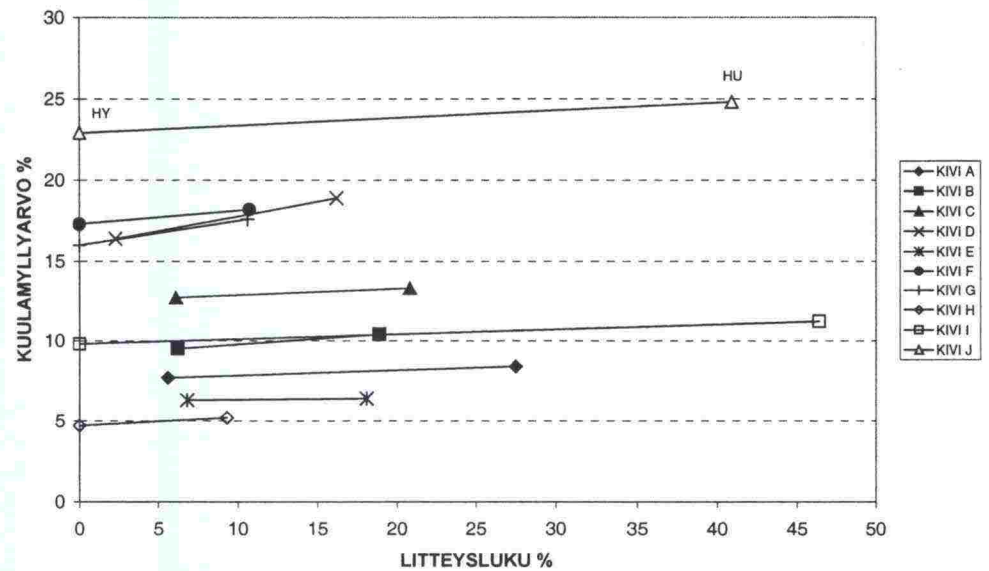
Raemuodon vaikutus oli täysin kivikohtaista eikä aineistosta pystytty erottelamaan kivien mineralogisten tai rakenteellisen seikkojen vaikutusta kyseiseen asiaan. Ainoastaan voidaan todeta, että tutkimuksen ainoilla tummilla, emäksisillä kivillä, joilla kiintotiheys oli yli 3 g/cm³, raemuodon vaikutus kuulamylyarvoon oli vähäistä tarkasteltaessa tuloksia %-yksikköinä. Samaa asiaa prosentteina tarkasteltaessa mukaan voidaan vielä lisätä vuolukivi, joten edellä mainituksi kiintotiheysrajaksi saadaan noin 2,9 g/cm³. Kulutuskestävyydeltään hyvin heikoilla kivillä eli vuolukivellä ja kalkkikivellä litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen suurensi kuulamylyarvoa noin 2,7 ja 0,3 %-yksikköä, mutta prosentteina vaikutus oli vain 3 ja 1 %.

Kuvassa 7 esitetään raemuodon vaikutus kuulamylyarvoon kivillä A – J eli tyypillisillä suomalaisilla kivillä. Vaikutus on selvin kivillä D, G ja H, jotka ovat mineralogisesti ja rakenteellisesti selvästi toisistaan poikkeavia kiviä. Kaikki tarkastelut perustuvat vain kahteen raemuotoluokkaan / kivi ja olettamukseen, että raemuodon vaikutus kuulamylyarvoon on lineaarista.

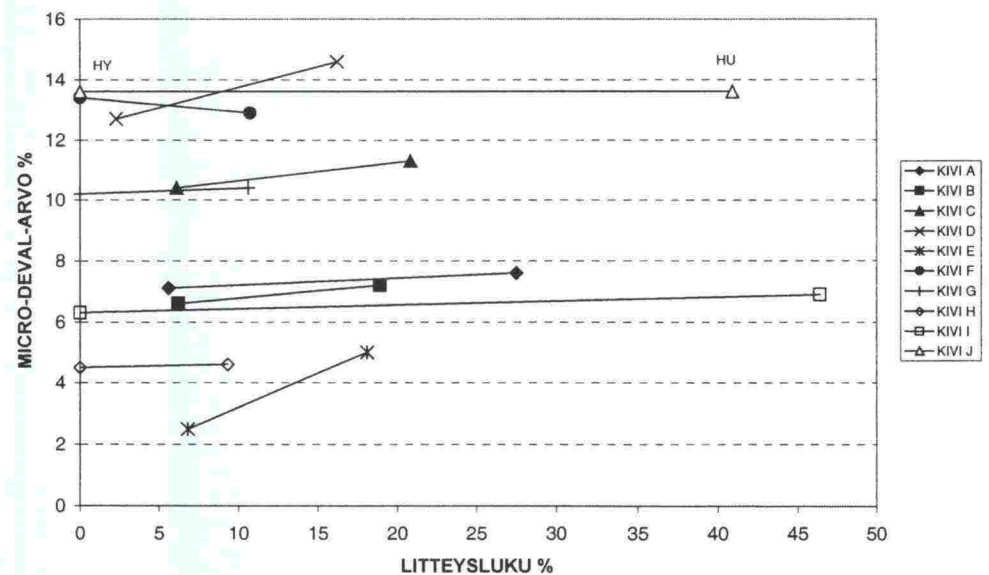
Kiviaineksen raemuodon vaikutus Micro-Deval-arvoon oli vielä selvemmin kivikohtaista kuin vaikutus kuulamylyarvoon. Litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen suurensi Micro-Deval-arvoa tutkituilla kivillä pääosin vain 0,1 – 0,6 %-yksikköä eli 2 – 7 %. Tällöin liikutaan usein jo itse menetelmän virherajojen puitteissa. Yhdellä kivellä raemuoto ei vaikuttanut tulokseen ja kolmella kivellä saatiin jopa ns. negatiivinen vaikutus eli raemuodon paraneminen heikensi vähäisessä määrin Micro-Deval-arvoa. Viimeksi mainituista kivistä kaksi oli kulutuskestävyydeltään hyvin heikkoja kiviä eli vuolukivi ja kalkkikivi. Oletettavasti näin heikoilla kivillä raemuodolla ei ole enää merkitystä hiovan lujuskokeen tulokseen.

Kahdella kivellä raemuodon vaikutus Micro-Deval-kokeen tulokseen oli huomattava. Kivillä D ja E, jotka ovat kiilleliuske ja emäksinen vulkaniitti, litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen suurensi Micro-Deval-arvoa 1,3 ja 2,2 %-yksikköä ja prosentteina ilmaistuna 10 ja jopa 69 %. Kuvassa 8 esitetään raemuodon vaikutus Micro-Deval-arvoon kivillä A – J eli tyypillisillä suomalaisilla kivillä.

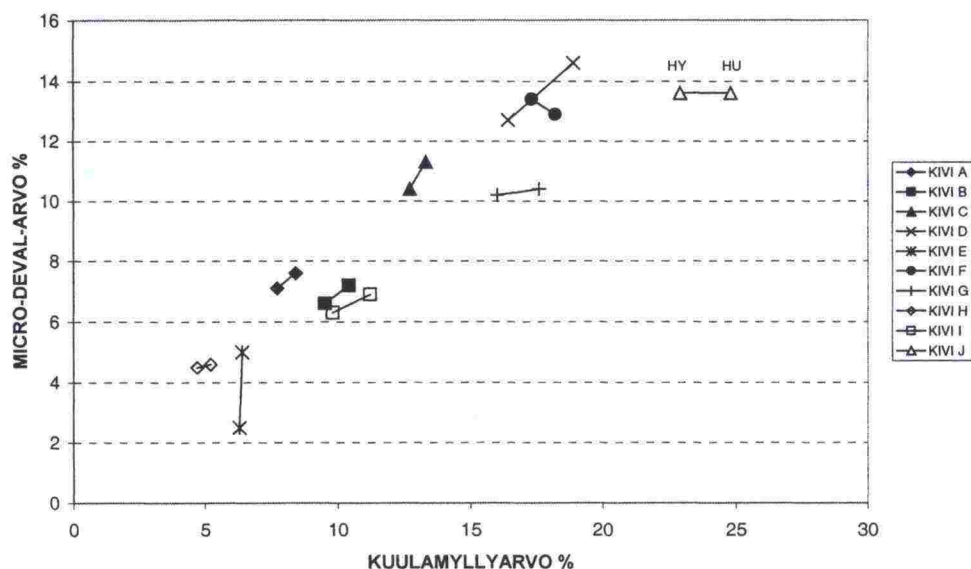
Kuvassa 9 esitetään kuulamyly- ja Micro-Deval-arvojen suhde kahdella eri raemuotoluokalla. Kivillä A – D ja I raemuoto vaikutti samalla tavalla sekä kuulamyly- että Micro-Deval-kokeen tulokseen. Kivellä E raemuoto vaikutti vain Micro-Deval-arvoon ja toisaalta taas kivillä G ja J raemuoto vaikutti vain kuulamylyarvoon. Kivellä H raemuodon vaikutus oli vähäinen molempien lujuskokeiden tulokseen ja kivellä F raemuodon huononeminen jopa paransi Micro-Deval-arvoa. Kuvasta 9 ei nähdä kuitenkaan eri kivien hyvän ja huonon raemuodon omaavien kiviainesten litteyslukujen erotusta, joka vaihteli huomattavasti tutkituilla kivillä.



Kuva 7. Raemuodon vaikutus kuulamylyarvoon tyypillisillä suomalaisilla kivillä.



Kuva 8. Raemuodon vaikutus Micro-Deval-arvoon tyypillisillä suomalaisilla kivillä.



Kuva 9. Raemuodon vaikutus kuulamyly- ja Micro-Deval-arvoihin tyypillisillä suomalaisilla kivillä.

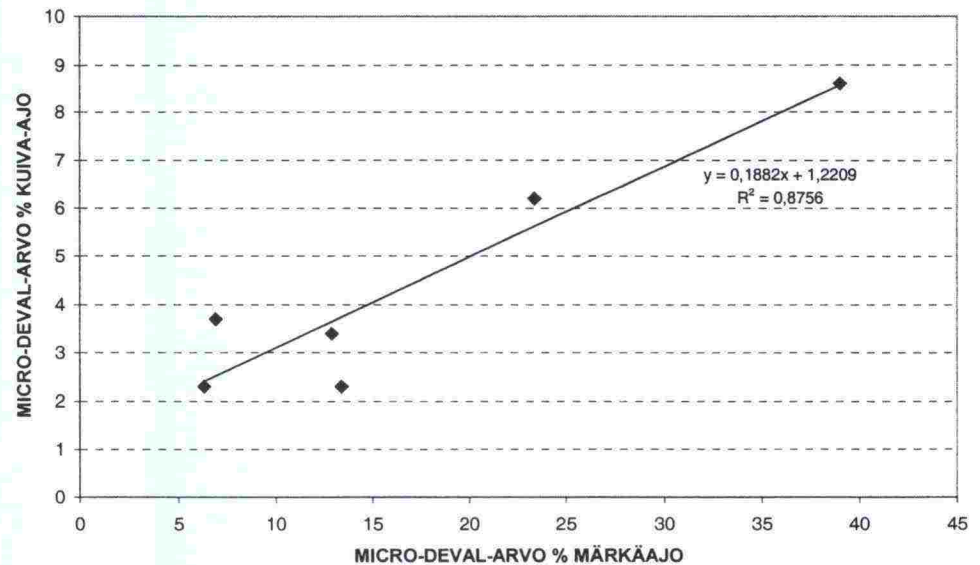
Kiviaineksen raemuodon parantamisen on todettu parantavan jonkin verran myös päälysteen kulumiskestävyyttä /18, 19/. Jotta laboratoriolaitteen tulokset korreloisivat hyvin päälysteen kulumisen kanssa, tulisi kiviaineksen raemuodon vaikutus näkyä myös laboratoriolaitteen tuloksissa. Kaikki tutkimuksessa mukana olevat kivet huomioiden kuulamylykoe vaikuttaa tuovan esille Micro-Deval-koetta luotettavammin raemuodon vaikutuksen lujuusarvoon. Niillä 12 kivellä, joilla tutkittiin raemuodon vaikutusta lujuustulokseen, kaikilla kivillä raemuodon paraneminen paransi myös kuulamylyarvoa, kun taas Micro-Deval-arvo parani raemuodon parantuessa vain 8 kivellä.

Micro-Deval-kokeella kuudella kiviaineksella tehdyt kuiva-ajot osoittivat, että koemenettely korreloi hyvin Micro-Deval-kokeen normaalin märkäajon ($r = 0,94$) ja kuulamylykokeen ($r = 0,94$) kanssa. Näillä kiviaineksilla normaalisti märkäajona tehdyn Micro-Deval-arvon ja kuulamylyarvon välinen korrelaatiokerroin on niinkin hyvä kuin 1,00. Kuiva-ajo toi märkäajoon verrattuna paremmin esiin kivien F ja I raemuodon vaikutuksen Micro-Deval-arvoon. Tulokset olivat lukuarvoltaan 46 – 83 % pienempiä kuin märkäajossa, joten mikäli kuiva-ajoa halutaan käyttää kiviainesten luokittelussa, tulisi sille luoda erilliset laatuluokkavaatimukset. Toisaalta tarkasteltaessa vain tyypillisiä suomalaisia kiviä (F ja I) voidaan todeta että Micro-Deval-kokeen kuiva-ajon riippuvuus sekä saman kokeen märkäajon että kuulamylykokeen kanssa oli heikko (kuvat 10 – 11).

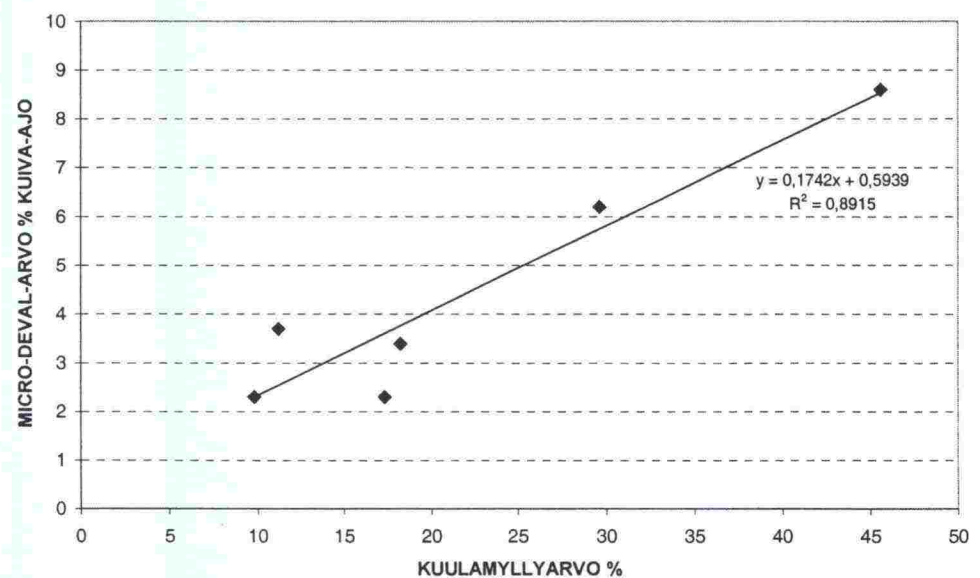
Liitteessä 1 esitettyjen kuulamylykokeen tulosten perusteella kahden saman kiviaineksen yksittäisnäytteen kuulamylyarvojen välinen erotus vaihteli välillä 0 – 4,4 %-yksikköä. Keskimäärin erotus oli 0,8 %-yksikköä. Yhtä näytettä lukuun ottamatta yksittäistulokset täyttivät menetelmäkuvauksen vaatimuksen (tulosten erotus ≤ 7 % niiden keskiarvosta). Kiviaineksella 2 vaadittu minimiero ylittyi juuri ja juuri, mutta tätä ylitystä ei huomioitu, koska ylitys

oli vähäinen ja koska yksittäisnäytteet oli tässä tapauksessa testattu eri aikoina ero seulontaeristä.

Micro-Deval-kokeen rinnakkaisnäytteiden tulokset erosivat toisistaan 0 – 3,8 %-yksikköä. Keskimäärin erotus oli kuulamylykokeen tavoin 0,8 %-yksikköä. Kuuden kuiva-ajon rinnakkaistulokset erosivat toisistaan keskimäärin 0,6 %-yksikköä (0,1 – 1,6 %-yks.).



Kuva 10. Micro-Deval-kokeen kuiva- ja märkäajojen välinen riippuvuus.



Kuva 11. Micro-Deval-kokeen kuiva-ajon ja kuulamylykokeen välinen riippuvuus.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella kuulamylykokeen ja Micro-Deval-kokeen tulokset korreloivat erittäin hyvin keskenään. Korrelaatiokerroin (r) vaihtelee tutkittavasta kiviainesryhmittelystä riippuen välillä 0,92 – 0,99. Tämän perusteella kuulamylykoe voidaan tarvittaessa korvata Micro-Deval-kokeella niin päällystekiviainesten kuin sitomattomien kerrosten kiviainesten testauksessa ja luokittelussa.

Menetelmien hyvästä keskinäisestä riippuvuudesta johtuen nykyisille päällystekiviainesten kuulamylyarvoon perustuvilla laatuluokkien raja-arvoille voidaan melko luotettavasti antaa vastaava Micro-Deval-arvo. Alle 20 % kuulamylyarvon omaavilla päällystekiviaineksilla mahdollinen Micro-Deval-arvo tulee asettaa varmuuden vuoksi varmalle puolelle eli lukuarvoltaan mahdollisimman pieneksi. Tämä johtuu siitä, että tuloksissa on näillä kiviaineksilla kohtalaisen suuri hajonta ja että ei ole varmaa tietoa Micro-Deval-arvon ja tiekulumisen välisestä riippuvuudesta. Kuulamylyarvoja 7, 10, 14, 19 ja 30 % vastaavat lujuusluokkien raja-arvot voisivat tällöin olla Micro-Deval-arvoina 4, 6, 9, 13 ja 19 %. Lievemmin arvosteltuna arvot voisivat olla 5, 7, 10, 14 ja 21 %.

Kuulamylyarvon ja tiekulumisen välisestä riippuvuudesta on runsaasti tietoa, mutta Micro-Deval-arvon ja tiekulumisen välistä riippuvuutta on Suomessa toistaiseksi selvitetty tiettävästi vain kaupunkiolosuhteissa /11/. Kyseisessä minikoetimen menetelmällä toteutetussa tutkimuksessa kuulamylyarvo ($r = 0,94$) korreloi jonkin verran paremmin päällysteen kulumisen kanssa kuin Micro-Deval-arvo ($r = 0,82$) (liite 2) /20/. Suurimmalla osalla kyseisistä kiviaineksista Micro-Deval-arvo oli 6 – 12 %, joilla arvoilla myös päällysteen kulumisen ennakoiminen oli suuren hajonnan vuoksi epäluotettavaa. Päällysteen kulumisen ja Micro-Deval-kokeen tulosten välinen riippuvuus tulisi-kin varmentaa ennen menetelmän käyttöönottoa muissakin olosuhteissa kuin kaupungissa. Helpoiten tämän voisi toteuttaa rakentamalla minikoetie, jossa päällysteeseen jyrskittyihin uriin asetettaisiin laboratoriossa tehtyjä ja eri kiviaineksia sisältäviä päällystelaattoja.

Laboratoriotyöskentelyn kannalta Micro-Deval-koe on kuulamylykoetta jonkin verran miellyttävämpi tehdä, koska molemmat näytteet voidaan ajaa samanaikaisesti päinvastoin kuin kuulamylykokeessa. Kuulamylykokeen lyhyempi ajoaika kompensoi osin tätä eroa. Menetelmänä ne eroavat toisistaan lähinnä siinä, että Micro-Deval-koe on kuulamylykoetta hiovampi koe.

Kiviaineksen raemuodon vaikutus kuulamyly- ja Micro-Deval-arvoihin oli melko vähäistä ja kivikohtaista. Kahden raemuotoluokan (ns. hyvä ja huono raemuoto) perusteella / kivi, esimerkiksi litteysluvun 10 %-yksikön suurenneminen (raemuodon huononeminen) suurensi kuulamylyarvoa tutkituilla kivilä noin 0,1 – 2,7 %-yksikköä eli 1 – 11 %.

Micro-Deval-arvoon vastaava raemuodon vaikutus oli pääosin 0 – 0,6 %-yksikköä eli 0 – 7 %. Muista kivistä poiketen kahdella kivellä raemuodon vaikutus Micro-Deval-kokeen tulokseen oli huomattava. Kivillä D ja E, jotka ovat

kiilleliuske ja emäksinen vulkaniitti, litteysluvun 10 %-yksikön suureneminen suurensi Micro-Deval-arvoa 1,3 ja 2,2 %-yksikköä ja prosentteina ilmaistuna 10 ja jopa 69 %. Kaikki tutkimuksessa mukana olevat kivet huomioiden kuulamylykoe vaikuttaa tuovan esille Micro-Deval-koetta luotettavammin raemuodon vaikutuksen lujuusarvoon.

Micro-Deval-kokeella kuudella kiviaineksella tehdyt kuiva-ajot osoittivat, että koemenettely korreloi hyvin Micro-Deval-kokeen normaalin märkäajon ($r = 0,94$) ja kuulamylykokeen ($r = 0,94$) kanssa. Tulokset olivat lukuarvoltaan 46 – 83 % pienempiä kuin märkäajossa, joten mikäli kuiva-ajoa halutaan käyttää kiviainesten luokittelussa, tulisi sille luoda erilliset laatuluokkavaatimukset. Toisaalta kuiva-ajo ei välttämättä sovellu suomalaisille kiviaineksille, koska näillä Micro-Deval-kokeen kuiva-ajon riippuvuus sekä saman kokeen märkäajon että kuulamylykokeen kanssa oli heikko.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittämismenetelmä. Pohjoismainen testi (kuulamylymenetelmä). Suomen Standardisoimisliitto SFS, Standardi SFS-EN 1097-9, vahvistettu 1998-08-31 , 7 sivua.
- /2/ Murskaustyöt. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Työselitykset ja laatuvaatimukset. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki 1999. 30 sivua. ISBN 951-726-464-x, TIEL 2212809-98.
- /3/ Asfalttinormit 1995. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. Helsinki 1995. 66 sivua.
- /4/ Kiviainekset. Kuulamylykoe. Raaka-ainetest. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. PANK-2207. Hyväksytty 11.9.1995. 4 sivua.
- /5/ Asfalttinormit 2000. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. Jyväskylä 1999. 74 sivua.
- /6/ Kiviainekset. Kuulamylykoe. Tuotetest. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. PANK-2208. Hyväksytty 11.9.1995. 4 sivua.
- /7/ Kiviaines. Kuulamylyarvo. VTT, Yhdyskuntatekniikka, Tie- ja geotekniikka. VTT-menetelmäkuvaus TIE 242. 1.11.1994. 7 sivua.
- /8/ Raidesepelin laatuvaatimukset. VR. 30.6.1995. 30 sivua.
- /9/ Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval). European Standard, final draft, prEN 1097-1, march 1996. 10 sivua.
- /10/ Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Kulutuskestävyyden määrittäminen (Micro-Deval). Suomen Standardisoimisliitto SFS, Voimaansaattamisilmoitus, SFS-EN 1097-1, vahvistettu 1997-01-07. 1 sivu.
- /11/ Katurakenteet ja -päällysteet-tutkimusohjelma. Katupäällysteet-tutkimukset 1997 – Koekohteet, ennakkotutkimukset ja seuranta. VTT Yhdyskuntatekniikka, Suomen Kuntaliitto ja Ympäristöministeriö. 29 sivua.
- /12/ Aggregates for railway ballast. European Standard, draft, prEN 13450, january 1999. 27 sivua.

- /13/ Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. European Standard, draft, prEN 13043, may 1999. 36 sivua.
- /14/ Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. European Standard, draft, prEN 13242, april 1998. 30 sivua.
- /15/ Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku. Suomen Standardisointiliitto SFS, Standardi SFS-EN 933-3, vahvistettu 1997-06-16, 7 sivua.
- /16/ Kiviainekset. Kiintotiheys. Pyknometri, avopyknometri, vedessä punnitseminen. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. PANK-2107. Hyväksytty 4.5.1995. 6 sivua.
- /17/ Päällistystyöt. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Työselitykset ja laatuvaatimukset. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki 1998. 53 sivua. ISBN 951-726-400-3, TIEL 2212802-98.
- /18/ Vuorinen, Jarmo; Kurki, Timo; Alkio, Risto; Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-päällysteiden kulumiskestävyyteen – Loppuraportti Vt 1:n minikoeteiden tutkimuksista. Helsinki 1998. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Tielaitoksen selvityksiä 37/1998, 39 s., ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-459-3, TIEL 3200529.
- /19/ Vuorinen, Jarmo; Kiviaineksen raemuodon vaikutus päällysteiden kulumiskestävyyteen ja työstettävyyteen. Päällistekurssit 1998, Asfalttiliitto ry., 12 s.
- /20/ Katurakenteet ja –päällysteet-tutkimusohjelma. Katupäällysteet-tutkimukset 1999 – Seuranta. VTT Yhdyskuntatekniikka, Suomen Kuntaliitto ja Ympäristöministeriö. Julkaisematon raportti.

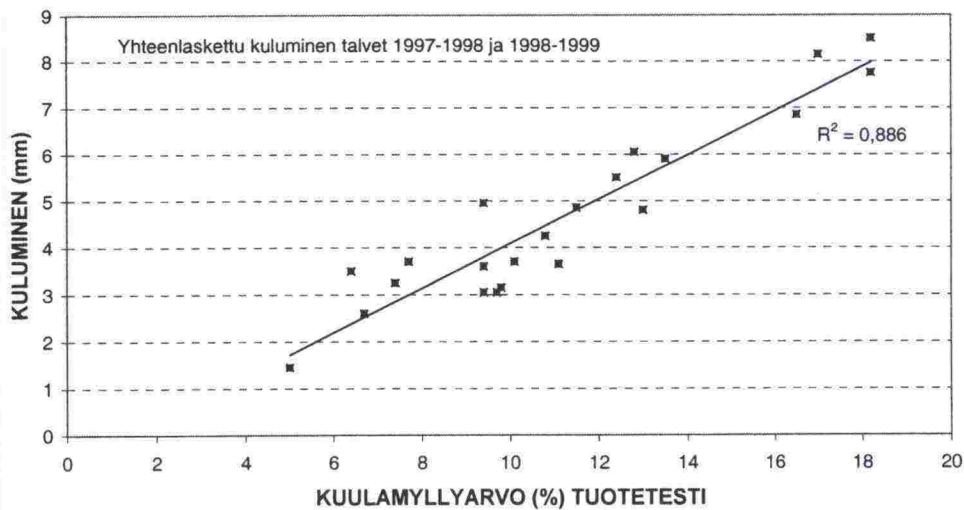
Tutkittujen kiviainesten kuulamylyarvot (KM_1 ja KM_2 = yksittäisnäytteet 1 ja 2, KM_{KA} = yksittäisnäytteiden keskiarvo, ERO = yksittäisnäytteiden sallittu \pm ero keskiarvosta) ja Micro-Deval-arvot (MD_1 ja MD_2 = rinnakkaisnäytteet 1 ja 2, MD_{KA} = rinnakkaisnäytteiden keskiarvo). * = Micro-Deval-koe kuiva-ajona.

KIVI- AINES N:RO	MUOTO	KM_1 %	KM_2 %	KM_{KA} %	ERO %-yks	MD_1 %	MD_2 %	MD_{KA} %
1	Hyvä	8,0	7,4	7,7	0,5	7,2	7,0	7,1
2	Huono	9,1	7,7	8,4	0,6	8,0	7,2	7,6
3	Hyvä	9,5	9,4	9,5	0,7	6,3	6,9	6,6
4	Huono	10,0	10,8	10,4	0,7	7,1	7,2	7,2
5	Hyvä	12,3	13,0	12,7	0,9	10,4	10,4	10,4
6	Huono	13,1	13,5	13,3	0,9	10,7	11,8	11,3
7	Hyvä	15,7	17,0	16,3	1,1	12,2	13,2	12,7
8	Huono	19,6	18,2	18,9	1,3	15,0	14,2	14,6
9	Hyvä	5,9	6,7	6,3	0,4	2,3	2,7	2,5
10	Huono	6,4	6,4	6,4	0,4	4,8	5,1	5,0
11	Hyvä	16,6	17,9	17,3	1,2	13,9	12,8	13,4
11	Hyvä	-	-	-	-	3,1*	1,5*	2,3*
12	Huono	18,2	18,2	18,2	1,3	13,1	12,7	12,9
12	Huono	-	-	-	-	3,7*	3,1*	3,4*
13	Hyvä	16,0	16,0	16,0	1,1	10,1	10,2	10,2
14	Huono	18,7	16,5	17,6	1,2	10,2	10,5	10,4
15	Hyvä	4,7	4,7	4,7	0,3	4,6	4,4	4,5
16	Huono	5,3	5,0	5,2	0,4	4,5	4,6	4,6
17	Hyvä	10,1	9,4	9,8	0,7	6,5	6,0	6,3
17	Hyvä	-	-	-	-	2,2*	2,3*	2,3*
18	Huono	11,3	11,0	11,2	0,8	6,7	7,0	6,9
18	Huono	-	-	-	-	3,9*	3,4*	3,7*
19	Hyvä	23,1	22,7	22,9	1,6	13,4	13,7	13,6
20	Huono	24,1	25,5	24,8	1,7	13,2	13,9	13,6
21	Hyvä	85,5	83,7	84,6	5,9	78,7	78,9	78,8
22	Huono	95,1	94,8	95,0	6,6	70,8	72,4	71,6
23	Hyvä	49,1	44,7	46,9	3,3	34,1	37,9	36,0
24	Huono	47,4	47,6	47,5	3,3	36,4	34,0	35,2
25	Hyvä	47,2	46,8	47,0	3,3	35,1	34,9	35,0
26	Hyvä	29,5	29,7	29,6	2,1	23,3	23,4	23,4
26	Hyvä	-	-	-	-	6,3*	6,1*	6,2*
27	Huono	45,9	45,2	45,6	3,2	40,4	37,6	39,0
27	Huono	-	-	-	-	8,8*	8,3*	8,6*

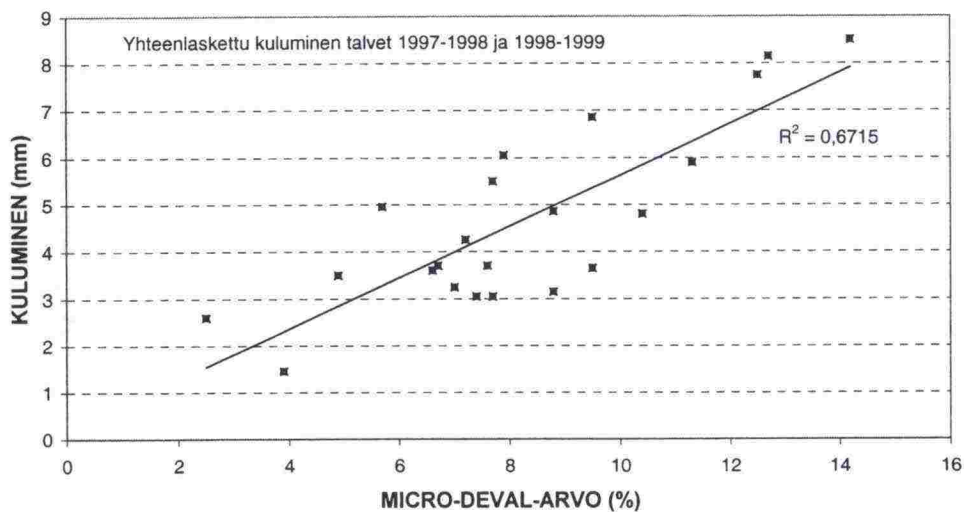
LIITE 2

Katurakenteet ja -päällysteet-tutkimusohjelman katupäällystetutkimukset 1999. Mannerheimintien minikoeteiden 1996 ja 1997 talvien 1997 – 1998 ja 1998 – 1999 yhteenlasketun kulumisen riippuvuus kuulamylyarvon (tuotetestin) ja Micro-Deval-arvon kanssa.

MINIKOETIET 1996 & 1997 MANNERHEIMINTIE



MINIKOETIET 1996 & 1997 MANNERHEIMINTIE



Ympäristö/vaikutukset

TIEL 3200555	Ohikulkutie ja taajama (TS 9/1999)
TIEL 3200558	Niittykasvillisuuden perustaminen tieluksiin - Koetuloksia ja kirjallisuusselvitys (TS 12/1999)
TIEL 3200560	Saneerattujen taajamien viherympäristö, kivetyt pinnat, kalusteet - Kuntotarkastelu (TS 15/1999)
TIEL 4000205	Tierummut vaellusesteinä - Ongelman kuvaus ja ratkaisumalleja (SJ 22/1999)
TIEL 4000206	Suomen tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset - Vuoden 1996 selvityksen päivitys (SJ 23/1999)
TIEL 4000215	Tieliikenne-ennuste vuosille 1997-2030. Vuoden 1995 ennusteen päivitys (SJ 35/1999)
TIEL 4000216	Tieliikenteen ajokustannukset: Onnettomuuskustannukset Suomessa ja Ruotsissa (SJ 36/1999)
TIEL 4000217	Tieliikenteen ajokustannukset: Ajoneuvokustannukset (SJ 37/1999)
TIEL 4000216	Tieliikenteen ajokustannukset: Aikakustannukset (SJ 36/1999)

Tietekniikka

TIEL 3200531	Liikennemerkkien tukien taipumaluokat prEN 12899-1 mukaan. Yleistä projektista - Tyypisarjojen tukien rakennesuunnittelun tarkistus - Uudet taipumaluokat (TS 39/1998)
TIEL 3200537	Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Siltojen pohjatutkimukset (TS 1/1999)
TIEL 3200539	Tiepenkereiden vetolujitteiden toiminta käyttötilassa (TS 47/1998)
Syvästabilointi	Tielaitoksen kohteissa:
TIEL 3200540	Osa 1: Toteutetut kohteet (TS 2/1999)
TIEL 3200541	Osa 2: Laadunvalvontatutkimukset ja laadunalitusten vaikutus (TS 3/1999)
TIEL 3200553	Uusiopäällystetutkimukset (TS 7/1999)
TIEL 3200557	Loivaluiskaisten teiden kuivatus (TS 11/1999)
TIEL 3200571	Asfalttinormien kiviainesten hienoainesseoksen laatuvaatimukset (TS 26/1999)
TIEL 3200575	Kuulamyly- ja Micro-Deval -kokeiden tulosten vastaavuus (TS 30/1999)
TIEL 3200578	Halvat kevyen liikenteen väylät (TS 35/1999)
TIEL 3200579	Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamylyllyarvoon (TS 36/1999)
TIEL 3200580	Kiviaineksen välilajitteen raemuodon vaikutus päällysteen ominaisuuksiin (TS 37/1999)
TIEL 3200591	Kasvipeitteisen meluesteen kokeilu (TS 2/2000)
TIEL 4000199	Selvitys tien häikäisy-suojista (SJ 5/1999)
TIEL 4000200	Kelirikkaisen soratien kantavuuden parantamismenetelmiä. Bitumistabilointi ja raudoitettu murske. Loppuraportti. (SJ 6/1999)
TIEL 4000201	Teiden talvihoidon yhteiskunnalliset vaikutukset. Yhteenvedo tehdyistä selvityksistä. (SJ 9/1999)
TIEL 4000202	Tutkimus- ja kehittämistoiminnan vuosiraportti 1998 (SJ 10/1999)
TIEL 4000209	Kevyen liikenteen kaatumistapaturmien selvittäminen sairauskertomusten perusteella - Jyväskylä (SJ 26/1999)
TIEL 4000210	Laatuvaatimusten asettaminen, kun urakka sisältää suunnittelun ja rakentamisen (SJ 27/1999)
TIEL 4000222	Tunnin pilotti. Hoidon toteutuminen, II väliraportti syyskuu 1999 (SJ 41/1999)
TIEL 4000228	Masuunikuonatuotteiden E-moduulit (SJ 49/1999)
TIEL 4000229	Analyttisessä mitoituksessa käytettävät asfalttipäällysteen jäykkyydet ja väsymismallit (SJ 50/1999)
TIEL 4000232	Tunnin pilotti - Vaikutus liikenneturvallisuuteen (SJ 54/1999)

OHJEET JALAAATUVAATIMUKSET

TIEL 2110014	Läjitysalueen suunnittelu - Läjitysalueohje
TIEL 2140015	Rakenteen parantamista edeltävät tutkimukset
TIEL 2140016	Puun käyttö melusteissa
TIEL 2150008	Luonnon monimuotoisuus ja tienpito - Tieluonnon hoito-ohjelma
TIEL 2150009	Tiehankkeiden ja tienpidon toimien ympäristövaikutusten selvittäminen
TIEL 2210013	TYLT: Tiekaiteet
TIEL 2212456-2000	TYLT: Perustamis- ja vahvistamistyöt
TIEL 2212802-2000	TYLT: Päälystystyöt
TIEL 2212809-98	TYLT: Murskaustyöt
TIEL 2230054	Kevyen liikenteen väylien hoito; menetelmätieto
TIEL 2240002-98	Yleiset arvonmuutosperusteet: Murskaustyöt
TIEL 2243560-2000	Yleiset arvonmuutosperusteet: Päälystystyöt

SELVITYKSIÄ (=TS) JA SISÄISIÄ JULKAISUJA (=SJ):

Liikennetekniikka

TIEL 3200561	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Ohitusnäkemät (TS 16/1999)
TIEL 3200570E	S 12 Improvement solutions for main roads: New road types - Summary on test roads in Finland (TS 25/1999)
TIEL 4000191	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uudet tietyypit - Koeteiden turvallisuus (SJ 20/1999)
TIEL 4000193	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uudet tietyypit - Selvitys ulkomaisista kokemuksista (SJ 21/1999)
TIEL 4000212	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Parannettavien pääteiden suuntaus (SJ 30/1999)
TIEL 4000213	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uusien tietyypivaihtoehtojen vertailu - Vt 6 välillä Koskenkylä - Kouvola Osa A: Raportti, Osa B: Liitekartat (SJ 31/1999)
TIEL 4000214	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Kevyen liikenteen ja yksityistieliittymien yhteiset ratkaisut (SJ 33/1999)
TIEL 4000221	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Tutkimussuunnitelma (SJ 42/1999)
TIEL 4000227	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Kapeiden pientareiden vaikutus kaksiajorataisten teiden turvallisuuteen (SJ 47/1999)